

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.5.8

درصد همانندی: ۱۵٪

ارزیابی نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا در بندر امام خمینی^(ه) با استفاده از سه نمونه الگوریتم فرا ابتکاری

زهرا غلامی

zgholami@pmo.ir

دکتری فیزیک دریا، معاونت مهندسی و توسعه امور زیربنایی، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۴

چکیده

بندر امام خمینی یکی از بنادر استان خوزستان در خلیج فارس است که با داشتن ۳۸ اسکله فعال به طول ۷ کیلومتر، بزرگ‌ترین بندر فعال ایران بوده و حجم لایروبی سالیانه در این بندر حدود ۶۰۰ هزار مترمکعب است که حدود ۴۰۰ هزار مترمکعب از آن مربوط به کانال دورق و حدود ۲۰۰ هزار مترمکعب مربوط به سایر اسکله‌های بندر است. از آنجاکه نرخ رسوب‌گذاری و هزینه لایروبی در این بندر چشمگیر است، در این پژوهش به بررسی و برآورد نرخ و حجم رسوب‌گذاری بر اساس اطلاعات میدانی و مدل‌سازی اخذشده از سازمان بنادر و دریانوردی و مقایسه این مقادیر با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های فراابتکاری تحت نرم‌افزار متلب در شرایط دوبعدی جریان و حضور همه عوامل مؤثر بر انتقال رسوب کرانه راستا در بندر امام خمینی (ره) پرداخته شد. پس از تلفیق سه معادله سرک و کامفز و بایرام (CKB) و محاسبه ضرایب و توان‌های بهینه به‌وسیله الگوریتم‌های کلونی مورچگان، ژنتیک و تکامل دیفرانسیلی و ارزیابی و صحت‌سنجی با مقادیر به‌دست‌آمده از داده‌های میدانی موجود، خطای ضرایب و توان‌های محاسبه‌شده با استفاده از روش میانگین مربعات و بایاس محاسبه شد، درنهایت مشاهده شد که ضرایب و توان‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک که در معادله CKB جایگذاری شدند بیشترین همپوشانی را با نرخ انتقال رسوب کرانه راستا حاصل از داده‌های میدانی دارد.

واژه‌های کلیدی: بندر امام خمینی (ره)؛ نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا (LSTR)؛ الگوریتم‌های فراابتکاری؛ معادله CKB؛

الگوریتم ژنتیک؛ الگوریتم کلونی مورچگان؛ الگوریتم تکامل دیفرانسیلی

۱. مقدمه

منطقه ویژه اقتصادی بندر امام خمینی (ره) با وسعت ۱۱۰۴۴ هکتار در شمال غربی خلیج فارس و در انتهای آبراه خور موسی قرار دارد. این آبراه با عمق متوسط ۲۰ متر، عرض ۲۵۰ متر و طول ۴۲ مایل دریایی بستری مطمئن برای رفت و آمد انواع کشتی‌های اقیانوس‌پیمای تجاری و نفت‌کش از مسیر خلیج فارس، تنگه هرمز، دریای عمان و اقیانوس هند به دورترین نقاط جهان فراهم نموده است. با توجه به مزایای منحصر به فرد این بندر از جمله نزدیکی به ۷۰ درصد از مراکز مهم صنعتی و جمعیتی کشور، هم‌جواری با منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی بندر امام، نزدیکی به منطقه آزاد تجاری اروند، قرار گرفتن در مسیر کریدور بین‌المللی حمل و نقل شمال- جنوب^۱ و کریدور بین‌المللی حمل و نقل شرق - غرب، قرار گرفتن در کوتاه‌ترین و مطمئن‌ترین مسیر زمینی حمل کالا از کشورهای عراق، ترکیه، حوزه قفقاز و آسیای میانه به کشورهای جنوب شرق آسیا، این بندر را به یکی از مهم‌ترین مراکز تجاری ایران و منطقه تبدیل کرده است [۱].

محاسبه نرخ انتقال رسوبات کرانه‌راستا که انتقال غالب در محدوده ساحل امام خمینی (ره) است، اهمیت فراوانی در تعیین مشخصات کلی طرح‌های مهندسی در محدوده ساحل این بندر دارد؛ چنین نرخی در پیش‌بینی عمر طرح، میزان ایمنی آن در مقابل رسوب‌گذاری و تعیین پریود لایروبی مورد نیاز نقش قابل توجهی خواهد داشت؛ بنابراین معادله ثابتی با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مؤثر که بتوان آن را در مواقع ضروری برای تخمین نرخ انتقال رسوب استفاده نمود نیز ضروری است.

۱-۱. تعریف مسئله

با بررسی تاریخچه رسوب‌گذاری در بندر امام خمینی (ره) مشاهده می‌شود که این بندر به شدت تحت تأثیر انتقال مواد رسوبی به موازات ساحل قرار دارد و برای حفظ عمق مناسب برای تردد کشتی‌ها و... نیاز به لایروبی در حوضچه بندر و

کانال دسترسی پیش‌بینی می‌شود. عدم توجه به فرسایش و به‌خصوص رسوب‌گذاری تهدیدی جدی برای این بندر محسوب می‌شود؛ بنابراین به منظور جلوگیری از عوارض جانبی این فرایندها لازم است اقدامات جدی برای بررسی تغییرات رسوب انجام داده شود و برای پیشبرد چنین هدفی لازم است تخمین‌های دقیقی از نرخ انتقال رسوب کرانه راستا در نواحی ساحلی بندر داشته باشیم.

انتقال رسوب کرانه‌راستا^۲ از مهم‌ترین موضوعات مورفودینامیک ساحل و مطالعات مهندسی سواحل است [۲]. این فرایند از آن نظر اهمیت فراوانی در تعیین مشخصات کلی طرح‌های مهندسی در محدوده ساحل دارد که اول انتقال غالب در محدوده ساحل است و دوم برای پیش‌بینی عمر سازه، میزان ایمنی آن در مقابل رسوب‌گذاری و تعیین بازه زمانی لایروبی مورد نیاز باید با در نظر گرفتن این انتقال مورد بررسی قرار گیرد [۳-۴].

چگونگی فرایند تغییرات خط ساحل ناشی از اجرای طرح‌ها در محدوده ساحل بستگی مستقیمی به میزان انتقال رسوبات موازی ساحل دارد و به همین دلیل محاسبه آن با دقت مناسب اهمیت فراوانی دارد. از طرفی هزینه‌های قابل توجه لایروبی سبب شده که برای طراحی بندر و سازه‌های ساحلی، مطالعات اولیه بسیاری در راستای بررسی فرایندهایی که در رسوب‌گذاری نقش دارند، انجام شود [۵].

بندر امام خمینی یکی از بزرگ‌ترین بنادر فعال ایران با ظرفیت پذیرش کالای بالغ بر ۳۷ میلیون تن در سال و با کاربری مختلف اسکله‌هایش است؛ به همین منظور برای دستیابی به افزایش ظرفیت اسکله‌های این بندر و دسترسی به اعماق بیشتر باید آثار احداث سازه‌ها روی هیدرونیامیک و رسوب پای اسکله‌ها و مناطق مجاور آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. توسعه اسکله‌های مطابق با طرح‌های پیشنهادی و تغییر در وضعیت

هیدرودینامیک و نرخ رسوب گذاری کرانه راستا در منطقه از مشکلات پیش رو تا حد امکان جلوگیری می‌نماید [۶].

۱-۲. اهمیت و توجیه انجام پژوهش

بندر امام خمینی (ره) با مشکلاتی از قبیل رسوب گذاری، جریان‌های کم سرعت، کم بودن عمق کانال برای رفت و آمد کشتی‌های بزرگ و لزوم توقف اجباری آن‌ها در مدخل کانال با بالا آمدن آب روبرو است. همچنین رسوب گذاری در کانال دسترسی و محدوده بندر باعث بروز مشکلاتی از قبیل لزوم انجام لایروبی‌های دوره‌ای می‌شود [۷]؛ اگرچه نتایج بسیاری از محاسبات مربوط به انتقال رسوب در این منطقه تقریباً تا حدودی به یک مقدار واحد منجر می‌شود؛ از طرفی این محدودیت برای علم مهندسی قابل قبول نیست؛ زیرا کیفیت فرمول به کار رفته، پارامترهای ورودی و نرم‌افزارهایی که نتایج به دست آمده با آن صحت‌سنجی می‌شوند می‌تواند در برآورد نتایج انتقال نرخ انتقال رسوب تفاوت فاحشی ایجاد کند. تاکنون معادلات انتقال رسوب موجود مقدار واحدی را در بندر امام خمینی (ره) ارائه نداده‌اند زیرا عملکرد یک معادله بستگی به قابلیت اطمینان و استفاده از داده‌ها در جدول مرجعی ثابت و در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مربوطه دارد. در این پژوهش با تلفیق سه فرمول سرک و کامفز و بایرام که اکثر پارامترهای مؤثر بر انتقال رسوب کرانه راستا را در نظر می‌گیرد و استفاده از مشهورترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری در یافتن جواب‌های بهینه، به معادله قابل قبولی برای محاسبه انتقال رسوب کرانه راستا حتی در فقدان داده‌های میدانی پرداخته شد.

هدف اصلی این پژوهش بررسی و تخمین نرخ انتقال رسوب و رفتار رسوبات موازی ساحل در سواحل بندر امام خمینی (ره) با استفاده از داده‌های موجود موج، جریان و باد و شرایط هیدرودینامیکی این منطقه و تجمیع فرمول‌های اساسی موجود رسوب از جمله سرک و کامفز و بایرام با مقایسه خروجی

مدل‌سازی نرم‌افزار مایک ۲۱ [۸] و استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری تحت نرم‌افزار متلب است.

۱-۳. مبانی نظری

انتقال رسوبات در راستای ساحل بسیار اتفاقی^۳ است که علت اصلی آن غیرقابل پیش‌بینی بودن آب‌وهوای مناطق ساحلی است [۹]. اتفاقی بودن پدیده انتقال رسوب در راستای ساحل به این معنی است که این پدیده در فواصل زمانی نامنظم رخ خواهد داد. واکنش بستر ماسه‌ای به امواج و جریان‌ها به اندازه رسوب و بزرگی جریان در مجاورت بستر بستگی دارد. هنگامی که مؤلفه‌های سرعت نوسانی نسبتاً کم باشند (اما همچنان از آستانه سرعت ذرات بیشتر باشند)، شکنج‌ها تشکیل خواهند شد. اگر سرعت‌های نوسانی زیاد باشد، شکنج‌ها شسته شده و انتقال رسوب در لایه نازکی شامل رسوب و آب در نزدیکی بستر به وجود می‌آید که به آن جریان ورقه‌ای^۴ اطلاق می‌شود. در هر دو رژیم جریان باید روش‌هایی کاربردی برای پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب با ترکیب جریان و موج مورد استفاده قرار گیرند [۵].

در انتقال رسوب کرانه‌راستا میانگین جریان‌ها بر فرایند شکست امواج مورب ورودی در حال حرکت به سمت ساحل تأثیر می‌گذارد و باعث به هم زدن ذرات رسوبی و هدایت آن‌ها از لایه‌های زیرین به سمت ساحل می‌شوند؛ برای این انتقال موازی با خط ساحل و خطوط کنتور عمیق است. این انتقال متفاوت از انتقال رسوب در رودخانه، باربستر و بارمعلق است.

امواج که بر مورفولوژی ساحل نقش اساسی دارند، بر انتقال رسوبات نیز مؤثر هستند، سرعت و غلظت رسوبات با گذشت زمان در دوره‌ای از یک موج تغییر نموده و طبعاً بر نرخ انتقال رسوب کرانه راستا^۵ نیز تأثیر می‌گذارد [۱۰]. معادله کلی انتقال رسوب کرانه راستا را می‌توان به صورت زیر گسترش داد:

$$S = 1/t' \int_{z=0}^{h+\eta} \int_{t=0}^{t'} C(z,t)V(z,t)dt dz \quad (1)$$

که در آن:

t' زمان کل بر حسب (s)

η افزایش ارتفاع سطح آب (m)

$V(z, t)$ سرعت لحظه‌ای در ارتفاع z در جهت x : m/s

h میانگین عمق آب (m)

$C(z, t)$ غلظت لحظه‌ای ستون آب در ارتفاع z
(m^3/m^3)

تغییرات محلی سرعت و غلظت در نتیجه تغییرات حرکت نوسانی امواج و در نتیجه آن جریان‌هاست.

وجود امواج و جریان‌ها به دلیل سرعتی که ایجاد می‌کنند و تغییرات غلظت رسوبی که در ساحل به وجود می‌آورند، عامل اصلی مؤثر بر نرخ انتقال رسوبات در ساحل است. سایر پارامترهایی که پژوهشگران مختلف از آن نام برده‌اند، همگی مشتقاتی از همین عوامل هستند [۱۱].

۱-۴. مروری بر کارهای مستند و مرتبط گذشته

تا به امروز در کنار مدل‌های عددی از جمله مایک ۲۱، CCHE 2D، DELFT3D و ...، الگوریتم‌های فراابتکاری نیز برای پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب کرانه راستا با محاسبه ضرایب و پارامترهایی در فرمول‌های اساسی موجود از جمله سرک^۶ (۱۹۸۴)، کامفز^۷ (۱۹۹۱) و بایرام^۸ (۲۰۰۷) ارائه شده‌اند [۳]. بایرام و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از اصول فیزیکی شکست موج در امتداد ساحل و انتقال رسوب به وسیله جریان‌ها رابطه انتقال رسوب متفاوتی را ارائه نمودند [۱۲].

میل هومنز و استیو^۹ (۲۰۱۶) در پژوهشی به بررسی معادله‌های بالک انتقال رسوب و صحت‌سنجی با تأثیر پارامترهای مختلف

و داده‌های وسیعی پرداختند، در نهایت آن‌ها مدلی را برای LST ارائه نمودند [۱۳].

غلامی و همکاران (۱۴۰۰) در مقاله‌ای نرخ انتقال رسوب کرانه راستا با استفاده از نظریه نیمه خودسانی و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مؤثر بر آن را بررسی کردند [۲].

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مراحل انجام پژوهش

در ابتدا با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای پس از تلفیق سه فرمول اصلی انتقال رسوبات موازی ساحل (سرک، کامفز و بایرام)، ضرایب و توان‌های بهینه با استفاده از داده‌های موج، جریان و باد در منطقه موردنظر و سه الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان، ژنتیک و تکاملی دیفرانسیلی تحت نرم‌افزار متلب محاسبه شد، سپس با اطلاعات موجود در پروژه پایش خوزستان که از سازمان بنادر و دریانوردی ایران اخذ شده بود، مقایسه شد.

۲-۲. الگوریتم‌های فراابتکاری

الگوریتم‌های فراابتکاری^{۱۰} یا فراتکاملی یا فرااکتشافی برای یافتن پاسخ بهینه به کار می‌روند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق^{۱۱} و الگوریتم‌های تقریبی^{۱۲} تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند، اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی کافی ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های قابل قبول (نزدیک به بهینه) با زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری^{۱۳} و فراابتکاری^{۱۴} تقسیم‌بندی می‌شوند.



شکل ۱. نمایی از محدوده مورد مطالعه

این منطقه از سواحل روستای امامزاده شاه عبدالله در جنوب غرب استان خوزستان و مرز استان بوشهر شروع شده و تا مرز ایران و عراق در رودخانه اروند ادامه می‌یابد. این محدوده شامل دریای آزاد در محدوده شمال غربی خلیج فارس بوده و خور عظیم موسی و خورهای بزرگ مریموس، ماهشهر و دورق را نیز شامل می‌شود. همچنین، شاخابه‌ها و رودخانه‌های متنوع و کوچک و بزرگ فراوان موجود در منطقه نیز در محدوده مطالعاتی این پروژه قرار می‌گیرند. شکل ۱ شمایی از محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۵].

۲-۴. جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

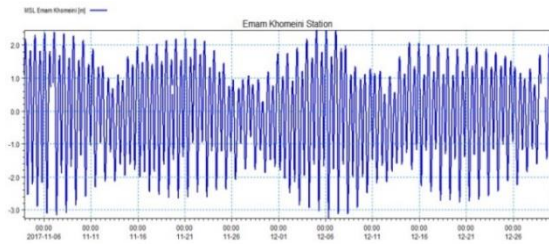
اطلاعات موجود و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در سواحل استان خوزستان به منظور شناسایی خصوصیات ساختاری و جنس سواحل استان توسط سازمان بنادر و دریانوردی گردآوری شده و این اطلاعات شامل دانه‌بندی، جنس رسوبات، تصاویر ماهواره‌ای، دبی و دبی رسوبی رودخانه‌ها و غلظت رسوبات معلق و کدورت آب است. ذرات معلق رسوب در این منطقه در دامنه رسوبات چسبنده و ریزدانه قرار دارند.

برای محاسبات تحلیلی بهینه‌سازی از یکی از نقاط دامنه تابع هدف آغاز و با توجه به گرادینان تابع مذکور به صورت خطی به نقطه دیگر منتقل خواهد شد. محاسبات یادشده برای نقاط جدید تکرار می‌شوند تا نقاط بعدی به دست آیند. به همین ترتیب عملیات تکراری روش‌های تحلیلی تا حصول همگرایی ادامه خواهد یافت. انجام عملیات بهینه‌سازی بر نقاط خاصی از دامنه تابع هدف و نیز حرکت خطی میان نقاط گفته‌شده، در بسیاری از موارد باعث همگرایی الگوریتم در بهینه موضعی تابع هدف می‌شود. این ویژگی در شرایطی که تابع هدف نوسانات شدید داشته باشد، تشدید خواهد شد، برای جبران این نقص، الگوریتم موردنظر در دفعات مختلف با نقاط آغازین مختلف تکرار شده تا پس از مقایسه نتایج آن‌ها اطمینان کامل از مقادیر محاسبه‌شده حاصل شود.

درواقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را داشته و در کمترین زمان بهترین جواب را در فضای بسیار گسترده‌ای از جستجو ارائه می‌نمایند، هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری مزایا و محدودیت‌های منحصر به فرد خود را دارند که بنا به ماهیت مسئله موردنظر منجر به انطباق آن با حل مسائل خاص می‌شوند [۱۴].

۲-۳. محدوده مطالعات

محدوده مطالعه در این پژوهش، سواحل خوزستان واقع در جنوب غرب کشور ایران می‌باشد.

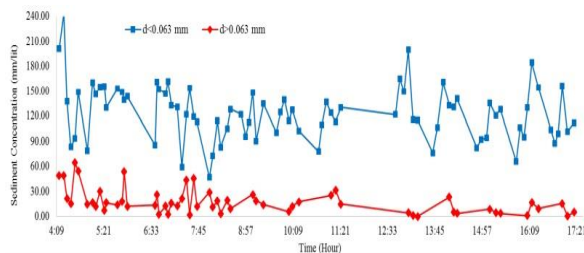


شکل ۵. نمودار سری زمانی تراز سطح آب در ایستگاه بندر امام خمینی



شکل ۶. موقعیت ایستگاه های اندازه گیری جریان و تراز سطح آب در پروژه مانیتورینگ خوزستان، سازمان بنادر و دریانوردی [۶]

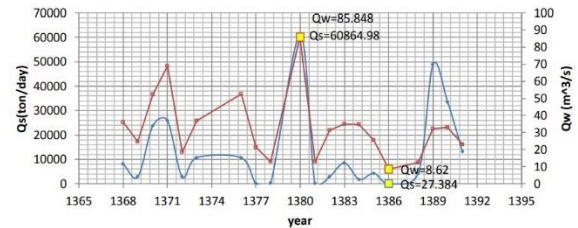
بنا بر اطلاعات اخذ شده از مطالعات مدل سازی هیدرودینامیک و رسوب محدوده های از بندر امام خمینی و پایش استان خوزستان سازمان بنادر و دریانوردی [۶]، سه نمونه رسوب بستر در محل ADCP های نصب شده در این بندر برداشت شده است، D50 مربوط به رسوب برداشت شده تقریباً برابر با ۰/۰۵ میلی متر است. از طرفی به دلیل اهمیت شناسایی مشخصات رسوب، در ۱۰ ایستگاه بندر امام خمینی نمونه رسوب برداشت شده است. در این میان، ۸ نمونه در اسکله سیلو و ۲ نمونه در اسکله های ۷ تا ۱۰ برداشت شده است.



شکل ۷. نمودار سری زمانی غلظت رسوب، سازمان بنادر و دریانوردی



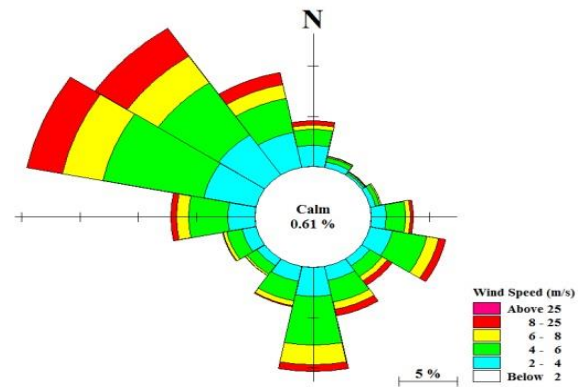
شکل ۲. محل انجام اندازه گیری های میدانی در بندر امام خمینی (ره) [۶]



شکل ۳. میزان دبی و رسوب ثبت شده ایستگاه پل فلور در رودخانه زهره [۶]

۲-۵. مدل سازی عددی انتقال رسوب

شبه سازی انتقال رسوب ساحلی با هدف مطالعه مورفولوژی مناطق خاص ساحلی و برآورد نرخ انتقال رسوب ساحلی و با در نظر گرفتن مصب رودهای مهمی مثل اروند، بهمن شیر و زهره که منابع اصلی رسوبی منطقه هستند و تأثیر مهمی بر رژیم رسوب گذاری دارند انجام شد. انتقال رسوب ساحلی اغلب در جریان های ساحلی ناشی از جزر و مد و امواج به وجود می آید. هم زمانی جریان ساحلی با امواج استفاده هم زمان از مدل های موج، جریان و رسوب را ایجاب می کند.



شکل ۴. گلباد ایستگاه سینوپتیک بندر ماهشهر

۴. تئوری و محاسبات

بر اساس آمار اخذشده، حجم لایروبی سالیانه بندر امام حدود ۶۰۰ هزار مترمکعب است که حدود ۴۰۰ هزار مترمکعب از آن مربوط به کانال دورق است و حدود ۲۰۰ هزار مترمکعب مربوط به تمام اسکله‌های بندر امام است. در مورد اسکله‌های ۷ تا ۱۰ باید این مطلب را بیان کرد که محل تلاقی اسکله ۱۰ و ۱۱ مستعدترین محل برای نشست رسوب است.

در هر یک از مناطق، بسته به قرارگیری منطقه در سواحل باز و یا داخل خورهای رودخانه‌ای و غیر رودخانه‌ای، از یک مدل محلی متناظر با مدل‌های موج و جریان مربوط به آن منطقه برای شبیه‌سازی رسوب استفاده شد. در این پژوهش ابتدا مدل دوبعدی رسوب [۸] با استفاده از نرم‌افزار مایک ۲۱ با استفاده از اطلاعات اخذشده از سازمان بنادر و دریانوردی شبیه‌سازی شد، سپس با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ضرایب مرتبط با فرمول‌های ادغام‌شده سرک و کامفز و بایرام استخراج و معادله بهینه‌ای محاسبه شد، پس از آن معادله مذکور با نتایج مدل‌سازی مقایسه، واسنجی و صحت‌سنجی شد و سپس نتایج بررسی شد.

به‌طورکلی دو روش برای پیش‌بینی نرخ LST می‌توان بیان کرد:

۱: فرمول‌های انتقال حجمی که معادله‌ها بر پایه ساده‌سازی‌های فرایندهای فیزیکی به‌دست آمده‌اند و اغلب از ضرایب تجربی برای کالیبراسیون آن‌ها استفاده می‌شود [۱۵].
مقادیر با استفاده از روابط فوق نیاز به کالیبراسیون از طریق داده‌های میدانی دارد زیرا وابسته به ضرایب تجربی هستند؛

۲: فرایندهای مبتنی بر مدل‌سازی، این حالت شامل تعداد زیادی از فرایندهای فیزیکی است که می‌تواند جزئیات LST را شبیه‌سازی کنند [۵].

با ادغام فرمول‌های سرک و کامفز و بایرام یک فرمول کلی که فقط پارامترهای مؤثر بر انتقال رسوب کرانه‌راستا در آن در نظر گرفته شده است را به‌صورت زیر داریم: [۱۱]

$$Q_s = C \frac{H_{sb}^{\alpha_1} T_p^{\alpha_2} m_b^{\alpha_3} d_{50}^{\alpha_4} \sin^{\alpha_5}(2\theta_b)}{(\rho_s - \rho)(1-a)} \quad (2)$$

که در آن $LST = Q_s$ ، $(m^3 \cdot s^{-1})$ مقدار حجمی انتقال رسوب کرانه‌راستا

θ_b زاویه بین ستیغ موج و خط ساحل در منطقه شکست

m_b شیب ساحل از منطقه شکست تا خط ساحل

ρ_s چگالی رسوب، ρ چگالی آب و a شاخص تخلخل است.

در این مرحله کلیه توان‌های مرتبط با پارامترهای به کار گرفته شده در معادله ۲ اعم از α_1 و α_2 و α_3 و α_4 و α_5 و ضریب C با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری محاسبه شد. برای محاسبه دقیق ضرایب فقط به یک الگوریتم کفایت نشد و سه نمونه از الگوریتم‌ها به شرح جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱. الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	عنوان الگوریتم	علامت اختصاری
۱	کلونی مورچگان ^{۱۵}	ACO
۲	ژنتیک ^{۱۶}	GA
۳	تکامل دیفرانسیلی ^{۱۷}	DE

جدول ۲. توان‌ها و ضرایب محاسبه‌شده با استفاده از الگوریتم‌های

فراابتکاری

الگوریتم	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	C
کلونی مورچگان	۱/۲	۰/۸	۰/۲۳	۰/۶۴	۰/۰۳۶	۲/۱
ژنتیک	۲/۶۸	۰/۹۶	۰/۱	-۰/۷۸	۰/۴	۲/۲۱
تکامل دیفرانسیلی	۱/۹۸	۰/۴۵	۰/۳	-۰/۴	۰/۰۲۱	۱/۸

جدول ۳. توان‌ها و ضرایب محاسبه شده معادله ۲ [۳]

فرمول	C	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
سرک؛ ۱۹۸۴	$k/16\rho_s(\frac{g}{\gamma_b})^{1/2}$	۲/۵	۰	۰	۰	۱
کامفر؛ ۱۹۹۱	۲/۲۷	۲	۱/۵	۰/۷۵	-۰/۲۵	۰/۶
بایرام؛ ۲۰۰۷	$\varepsilon(321/9\Pi/4/096C_f)\rho_s(\frac{g}{\gamma_b})^{1/2}$	۲/۵	۰	۰	۰	۱
میل هومنز؛ ۲۰۱۳	$0/15\rho_s^a$	۲/۷۵	۰/۸۹	۰/۸۹	-۰/۶۹	۰/۵

در جدول ۳، ضریب تجربی k برای فرمول سرک، $۰/۳۹$ است، $۰/۳۹$ برای حالتی است که ارتفاع موج شاخص در نزدیکی موج شکن در نظر گرفته شده است.

g شتاب گرانش، γ_b شاخص شکست H_b/h_b که در آن h_b عمق ناحیه شکست است، C_f فاکتور ضریب اصطکاک است که طبق فرمول بایرام، مقدار آن $۰/۰۰۵$ است و ε نیز ضریب انتقال مواد رسوبی است که در فرمول بایرام در نظر گرفته شده است.

فرمول بایرام و سرک دقیقاً با هم برابر می‌شوند اگر: $C_{Bayram} = C_{cerc}$ [۱۶] در حال حاضر مقادیر مختلف K توسط نویسندگان مختلف از سال ۱۹۷۰ تاکنون بازنگری شده و وابستگی‌های آن را به سرعت سقوط رسوبات، شاخص شکست موج و d_{50} را بیان می‌کنند.

به منظور ارزیابی عملکرد ضرایب محاسبه شده با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، RMSE خطای میانگین مربعی و Bias آن را محاسبه می‌کنیم که معادله‌های آن به ترتیب طبق فرمول ۳ و ۴ هستند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log(Qp.i) - \log(Qm.i))^2}{n}} \quad (۳)$$

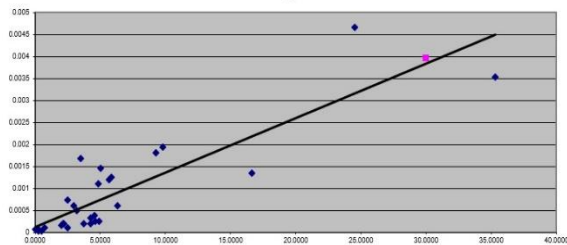
(۴)

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Qp.i) - \log(Qm.i))}{n}$$

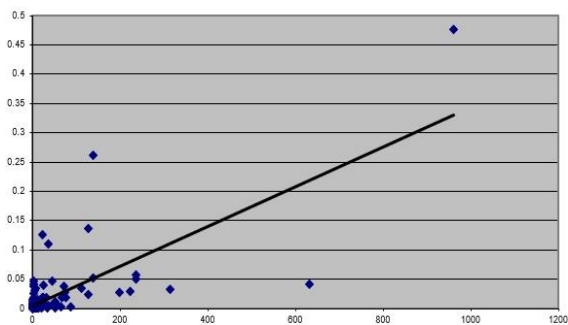
خطای مجموع مربعات^{۱۸} به‌طور معمول برای اندازه‌گیری خطا در محاسبات استفاده می‌شود. مجموع مربعات، برای مقادیر خطا و همچنین واریانس بیشتر وزن بیشتری را می‌دهد. بایاس^{۱۹} نیز فهم جامع از جابه‌جایی (انحراف) اطلاعات را فراهم می‌نماید [۲].

۵. بحث

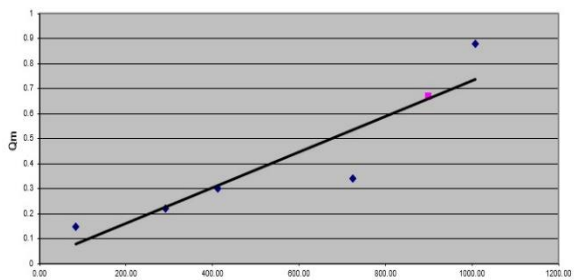
سه الگوریتم استفاده شده در این پژوهش تحت نرم‌افزار متلب یکی از شناخته‌شده‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی هستند؛ در دسترس بودن این الگوریتم‌ها یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای صحت‌سنجی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها با داده‌های میدانی هستند؛ از آنجاکه روش کلونی مورچگان نسبت به روش ژنتیک در مواردی که نمودار به‌صورت مدام با زمان تغییر می‌کرد، قابلیت تکرار را حفظ می‌کند، مزیت قابل توجهی نسبت به روش ژنتیک داشت؛ به همین دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در ارائه جواب بهینه ارائه داده و با گذشت زمان می‌تواند جواب را تغییر دهد؛ الگوریتم تکامل دیفرانسیلی نیز برای غلبه بر عیب اصلی الگوریتم ژنتیک، یعنی فقدان جستجوی محلی استفاده شد، تفاوت اصلی این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک در عملگر انتخاب بود، در این الگوریتم همه جواب‌ها دارای شانس مساوی برای انتخاب شدن بودند، از طرفی الگوریتم ژنتیک یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های مکاشفه‌ای برای یافتن جواب بهینه با معین بودن تابع هدف و قیود مسئله است و یک روش جستجوی تصادفی بر پایه مکانیزم انتخاب طبیعی است. از الگوریتم ژنتیک نیز استفاده شد زیرا بهترین گزینه برای پیش‌بینی بر مبنای رگرسیون بوده و از زیربخش‌های تابع برازش، نمایش، انتخاب و تغییر تشکیل شده است. الگوریتم ژنتیک بر خلاف سایر الگوریتم‌های منتخب در این پژوهش که عملیات جستجو را از یک نقطه آغاز می‌کنند، از چندین نقطه در فضای پاسخ به



شکل ۸. مقایسه مقادیر LST به دست آمده از الگوریتم ACO (خط مستقیم) و مدل سازی داده‌های میدانی



شکل ۹. مقایسه مقادیر LST به دست آمده از الگوریتم GA (خط مستقیم) و مدل سازی میدانی



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر LST به دست آمده از الگوریتم DE (خط مستقیم) و مدل سازی داده‌های میدانی

۷. نتیجه گیری

با بررسی هریک از الگوریتم‌ها و ضرایب محاسبه شده (جدول ۳)، سپس با محاسبه بایاس و مقادیر میانگین مربعی (جدول ۴) با مقادیر داده‌های میدانی [۶] خطای مربوط به الگوریتم ژنتیک از سایر الگوریتم‌ها کمتر و عدد به دست آمده میانگین مربعات نزدیک به صفر محاسبه شد:

$$Q_s = 2/21 \frac{H_{sb}^{2/68} T_p^{0/96} m_b^{0/1} d_{50}^{0/78} \sin^{0/4}(2\theta_b)}{(\rho_s - \rho)(1-a)} \quad (5)$$

جستجوی جواب بهینه پرداخت؛ بنابراین پاسخ آن نزدیک به بهینه کلی محاسبه شد. با در نظر گرفتن همه عوامل بالا بهینه‌ترین ضرایب و توان‌ها برای محاسبه نرخ انتقال رسوب کرانه راستا در معادله ۵ استخراج شد.

از همین روش برای سایر معادله‌های انتقال رسوب از جمله بار معلق و بار بستر می‌توان استفاده نمود و به ضرایب و توان‌های بهینه دست یافت، همچنین می‌توان پیش‌بینی نرخ انتقال آن‌ها را نزدیک به مقادیر واقعی محاسبه کرد و در شرایط مختلف دینامیکی ساحل برای استفاده‌های مهندسی از جمله لایروبی، ساخت‌وسازهای ساحلی استفاده نمود.

۶. یافته‌های پژوهش

از آنجاکه هدف ما در این پژوهش محاسبه معادله‌ای با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری و به صورت نظری بود که در شرایط دوبعدی جریان و حضور همه پارامترهای مؤثر بر انتقال رسوب کرانه راستا قابل استفاده باشد، پس از تلفیق سه معادله سرک و کامفرو بایرام ضرایب بهینه با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری محاسبه شد و برای صحت‌سنجی این مقادیر با مقادیر به دست آمده از داده‌های میدانی موجود و خطای محاسبه شده با استفاده از بایاس و روش میانگین مربعات که در جدول ۴ به طور خلاصه قابل مشاهده است، همچنین از نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ که شمایی از مقایسه مقادیر به دست آمده از الگوریتم‌های کلونی مورچگان، ژنتیک و تکاملی دیفرانسیلی و مدل سازی داده‌های میدانی است، استفاده شد.

جدول ۴. مقایسه میزان خطای فرمول‌ها با ضرایب محاسبه شده به وسیله الگوریتم‌های فرا ابتکاری

الگوریتم	بایاس	میانگین مربعات
ACO	۰/۷۸	۰/۴۶
GA	۰/۱۱	۰/۰۳
DE	۰/۵۳	۰/۱۲

مراجع

- [1] Port & Maritime Organization. Imam Khomeini Port Authority [internet]. 2022 [cited 2022 March 29]. Available from: [http:// https://bikport.pmo.ir/](http://https://bikport.pmo.ir/)
- [۲] غلامی زهرا، لاری کامران، بیدختی علی اکبری عباسعلی، جاوید امیرحسین، محاسبه نرخ انتقال رسوبات هم‌اندازه کرانه راستا در مناطق ساحلی با استفاده از نظریه نیمه خودسانی. مجله هیدروفیزیک. ۱۳۹۹؛ ۶(۲): ۱۳-۲۴.
- [3] Gholami Z, Lari K, Bidokhti A, Javid A. M. Revisiting the Derivation of Bulk Longshore Sediment Transport Rates using Meta-Heuristic Algorithms Journal of Ocean and Coastal Research. 2021; 69(1): 1-17.
- [4] Smith E, Wang P, Zhang J. Evaluation of the CERC formula using large-scale model data. Journal of Coastal Research. 2003; 3.
- [۵] غلامی زهرا. ارائه فرمول جدیدی برای محاسبه نرخ انتقال رسوب هم‌اندازه کرانه راستا در مناطق ساحلی با استفاده از نظریه نیمه خودتشابهی [رساله دکتری]. تهران: واحد علوم و تحقیقات تهران؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ ۱۴۰۰.
- [۶] معاونت مهندسی و توسعه امور زیربنایی. پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل استان خوزستان. رویه انجام مدل‌سازی انتقال رسوب؛ تهران: سازمان بنادر و دریانوردی؛ اردیبهشت ۱۳۹۹.
- [۷] کریوند عباس. مدل‌سازی انتقال رسوب کانال بندر امام خمینی (ره) با استفاده از نرم‌افزار Mike21 [پایان‌نامه کارشناسی ارشد]. خرمشهر: دانشگاه علوم و فنون دریایی؛ ۱۳۹۵.
- [8] Shore management eBook [internet]. 2022 [cited 2022 April]. Available from: <https://ocean.dhigroup.com/download-shoreline-management-guidelines/>
- [9] Bosboom J, Stive MJ. Coastal dynamics I [lectures note], Delft, Netherlands; CIE4305. 2012.
- [10] Coastal Engineering Research Center (US) CERC. Shore protection manual. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center; 1984. Vol. I and II.

مقادیر به دست آمده از معادله ۲ برای محاسبه نرخ انتقال رسوب کرانه راستا با ضرایب و توان‌های زیر کمترین انحراف از معیار را با مقادیر میدانی اخذ شده دارد:

به همین منظور پیشنهاد می‌شود، برای محاسبه نرخ انتقال رسوب کرانه راستا در نقاط مدنظر با در نظر گرفتن ارتفاع موج شاخص در نقطه شکست، شیب ساحل، دانه‌بندی رسوبات و توان‌ها و ضرایب به دست آمده از الگوریتم ژنتیک در معادله ۶ نیز علاوه بر داده‌های میدانی محاسبه و صحت‌سنجی شود.

مقایسه نتایج حاصل از کاربرد رابطه پیشنهادی با نتایج میدانی و سایر روابط موجود در متون، نشان می‌دهد که:

- ۱- رابطه جدید برای محاسبه نرخ انتقال رسوب نسبت به رابطه‌های پیشین، دقت بیشتری دارد؛
- ۲- استفاده از هر یک از الگوریتم‌های بیان شده در برخی از معیارها، عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگری دارند و متناسب با نتیجه موردنظر باید انتخاب شوند؛
- ۳- روش الگوریتم ژنتیک، بیانگر قدرت، همگرایی و سرعت بسیار بالا در محاسبات است؛
- ۴- زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که سرعت اجرای الگوریتم تکامل دیفرانسیلی به مراتب بیشتر از الگوریتم ژنتیک بوده به طوری که میانگین زمان اجرای الگوریتم تکامل دیفرانسیلی در تعداد جمعیت ۵۰ با مقدار ۲۲ ثانیه تقریباً سه برابر میانگین زمان اجرا در الگوریتم ژنتیک با مقدار ۷ ثانیه است.

سپاسگزاری

با تشکر از سازمان بنادر و دریانوردی - معاونت مهندسی و توسعه امور زیربنایی که با در اختیار قرار دادن داده‌های مربوط به پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل استان خوزستان به صحت‌سنجی در این پژوهش کمک بسیاری نمودند.

پی‌نوشت

1. INTSC
2. Longshore Sediment Transport (LST)
3. episodic
4. sheet flow
5. Longshore Sediment Transport Rate (LSTR)
6. CERC (Coastal Engineering Research Center (US)
7. Kamphuis
8. Bayram
9. Jao Mil-Homes
10. meta-heuristic algorithm
11. exact Algorithms
12. Approximate Algorithms
13. Heuristic
14. Hyper Heuristic
15. Ant Colony Optimization Algorithm
16. Genetic Algorithm
17. Differential Evolution Algorithm
18. RMSE (Root Mean Square)
19. Bias

- [11] Rijn LC, Ribberink JS, Werf JV, Walstra DJ. Coastal sediment dynamics: recent advances and future research needs. *Journal of hydraulic research*. 2013 Oct 1;51(5):475-93.
- [12] Bayram A, Larson M, Hanson H. A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*. 2007 Sep 1;54(9):700-10.
- [13] Mil-Homens J, Ranasinghe R, de Vries JV, Stive MJ. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. *Coastal Engineering*. 2013 May 1;75:29-39.
- [14] Fattahi P, Mehrabaad S, Jolai F.; Mathematical modeling and heuristic approaches to 264 flexible job shop scheduling problems. 2007.p. 8-26.
- [15] Kamphuis JW. Alongshore transport rate of sand. In: Smith JM, editor. *Proceedings of 28th International Conference of Coastal Engineering*; 2002 July; Cardiff, Wale. Scientific World Publishing; 2003.p. 2478-90.
- [16] Fernández-Fernández S, Baptista P, Martins VA, Silva PA, Abreu T, Pais-Barbosa J, et al. Longshore transport estimation on Ofir Beach in Northwest Portugal: sand-tracer experiment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2016 Mar 1;142(2):04015017.